

新能源汽车电池热管理系统优化与性能研究

林孝富 宋泽明 陈超伟 岑康康
温州德鑫机车部件有限公司 浙江温州 325200

【摘要】 电池热管理系统是保障新能源汽车动力电池安全高效运行的关键技术。本研究针对现有电池热管理系统存在的温度分布不均、能耗较高、极端工况适应性不足等问题，提出了一种基于多参数协同控制的优化方案。通过优化冷却流道结构设计、改进热管理控制策略，建立了集成式液冷与相变材料耦合的热管理架构。仿真与台架试验结果表明，优化后的系统在高温快充工况下将电池包最高温度控制在 42°C 以内，电芯间最大温差降低至 3.5°C ，系统综合能耗降低16.8%。研究成果可为新能源汽车电池热管理系统的工程化设计提供理论依据。

【关键词】 新能源汽车；锂离子电池；热管理系统；结构优化；控制策略

Research on Optimization and Performance Enhancement of Thermal Management Systems for New Energy Vehicle Batteries

Lin Xiaofu Song Zeming Chen Chaowei Cen Kangkang

Wenzhou Dexin Locomotive Components Co., Ltd. Wenzhou, Zhejiang 325200

【Abstract】 The battery thermal management system is a critical technology ensuring the safe and efficient operation of new energy vehicle power batteries. Addressing existing issues such as uneven temperature distribution, high energy consumption, and inadequate adaptability under extreme operating conditions, this study proposes an optimization solution based on multi-parameter coordinated control. By optimizing the cooling channel structure design and refining thermal management control strategies, an integrated thermal management architecture combining liquid cooling with phase-change materials was developed. Simulation and bench test results demonstrate that the optimized system maintains the battery pack temperature below 42°C during high-temperature fast charging, reduces the maximum temperature difference between cells to 3.5°C , and decreases overall system energy consumption by 16.8%. These findings provide a theoretical foundation for the engineering design of thermal management systems for new energy vehicle batteries.

【Key words】 New energy vehicles; Lithium-ion batteries; Thermal management systems; Structural optimization; Control strategies

引言

随着全球能源转型进程的加速，新能源汽车产业进入高速发展阶段。锂离子电池凭借其高能量密度、长循环寿命等优势，成为当前新能源汽车的主流动力源。然而，锂离子电池对工作温度极为敏感，适宜的温度区间通常为 15°C 至 35°C 。温度过高会加速电池老化，甚至引发热失控事故；温度过低则导致内阻增大、充放电效率下降，严重影响整车性能。此外，电芯之间的温度差异会引发电芯状态不一致，进而降低电池包的整体寿命与安全性。因此，高效可靠的电池热管理系统对于新能源汽车的推广应用具有重要意义。

当前国内外学者围绕电池热管理系统开展了大量研究工作。按照冷却介质的不同，热管理系统主要分为空气冷却、液体冷却、相变材料冷却及热管冷却等类型。空气冷却系统结构简单、成本较低，但冷却效率有限，难以满足高能量密度电池包的散热需求。液体冷却系统换热效率高、温度均匀性好，已成为主流技术方案，但其系统复杂度与能耗问题仍需进一步优化。相变材料利用潜热吸收原理可实现被动式热管理，但存在导热系数低、封装困难等工程应用瓶颈。近年来，混合式热管理方案逐渐成为研究热点，通过将液体冷却

与相变材料、热管等技术相结合，可充分发挥各技术的协同优势。

综合来看，现有研究在单一技术路径优化方面取得了显著进展，但在系统级多参数协同优化、极端工况下的适应性验证等方面仍存在不足。部分热管理系统在常规工况下性能良好，但在高温环境与快速充电耦合的严苛条件下，温度控制能力明显下降。此外，热管理系统的能耗与散热性能之间的平衡问题尚未得到充分解决。针对上述问题，本研究从系统集成的角度出发，提出了一种液冷与相变材料耦合的热管理架构，同时对冷却流道几何参数与控制策略进行联合优化，并通过仿真与试验手段验证系统性能。

一、电池热管理系统的需求分析与热特性

1.1 锂离子电池的热特性与安全边界

锂离子电池在充放电过程中伴随着不可逆热与可逆热的产生。不可逆热主要来源于欧姆内阻与极化内阻引起的焦耳热，可逆热则与电化学反应中的熵变相关。电池产热速率随充放电倍率的增大而显著提升，尤其在快速充电初期与高倍率放电阶段，瞬时产热功率可达常规工况的数倍。

温度对电池性能的影响体现在多个层面。低温条件下, 电解液粘度增大, 锂离子迁移速率下降, 负极析锂风险升高, 同时可用容量与功率输出能力显著衰减。高温条件下, 固体电解质界面膜加速生长, 活性锂消耗增加, 循环寿命缩短。当温度超过临界阈值时, 隔膜可能发生热收缩甚至熔融, 引发正负极直接接触导致内部短路, 进而触发热失控链式反应。此外, 电芯之间的温度差异会加剧电流分布不均, 使高温区域承受更大的充放电负荷, 形成正反馈机制, 加速电池包整体性能衰退。

从系统设计角度出发, 电池热管理系统的核心目标可归纳为三项: 一是将电池工作温度严格控制在安全边界之内, 通常要求最高温度不超过45℃; 二是维持电芯间及电芯内部的温度一致性, 最大温差一般应控制在5℃以内; 三是在满足前两项要求的前提下尽可能降低系统自身能耗。

1.2 现有热管理系统的技术特征与局限

空气冷却系统依靠风扇驱动空气流经电池表面或间隙带走热量。其优势在于结构简单、成本低廉、维护方便, 在早期电动乘用车及当前电动大巴中仍有应用。然而空气的比热容与导热系数较低, 随着电池能量密度的提升, 空冷系统已难以满足高热负荷下的散热需求, 且温度均匀性控制难度较大。

液体冷却系统采用水-乙二醇溶液等冷却介质, 通过液冷板或液冷管道与电池表面进行热交换。液冷系统的换热系数通常为空冷系统的数十倍, 能够有效应对高倍率充放电场景。目前主流液冷方案多采用蛇形流道或并联流道结构, 但在流道布局设计上仍存在优化空间, 部分方案存在局部流量分配不均的问题, 导致电池包边角区域温度偏高。

相变材料冷却属于被动式热管理技术, 利用材料固-液相变过程中的潜热吸收特性实现温度缓冲。石蜡类相变材料具有相变温度可调、潜热值较高的特点, 但其导热系数普遍偏低, 单纯依靠相变材料难以实现热量的快速导出。热管冷却具有极高的等效导热系数, 但结构复杂、成本较高, 目前主要应用于高端车型或特定场景。

综合上述分析, 单一技术路径均存在固有局限。通过液冷与相变材料的有机耦合, 可利用液冷回路主动导出相变材料储存的热量, 同时发挥相变材料的均温作用, 是提升系统综合性能的有效途径。

二、热管理系统优化设计

2.1 液冷与相变材料耦合热管理架构

本研究提出的耦合热管理系统由液冷循环回路、相变材料层、温度传感器网络及电子控制单元组成。相变材料填充于电芯之间的间隙以及电芯底部与液冷板之间的接触区域, 液冷板布置于电池模组下方。当电池温度低于相变材料熔点时, 相变材料保持固态, 主要通过导热方式传递热量; 当电池温度升高至相变点附近时, 相变材料开始熔融吸热, 延缓温度上升速率。液冷回路根据电池温度状态分级启动, 常态

下以低流量模式维持基础散热, 高温工况下切换至高流量模式并启动压缩机强化散热。

耦合架构的设计关键在于相变材料的选择与封装。综合考虑相变温度、潜热值、导热系数、化学稳定性及阻燃性能, 确定采用石蜡与膨胀石墨复合相变材料体系。膨胀石墨作为多孔支撑骨架, 既提高了复合材料的整体导热系数, 又可在相变材料熔化后维持形状稳定性, 防止液相泄漏。复合相变材料的相变温度设定为38℃, 潜热值达到185 kJ/kg, 等效导热系数为纯石蜡的8倍以上。

2.2 冷却流道结构优化

冷却流道的几何构型直接影响液冷系统的流动特性与换热效率。传统蛇形流道在流程中后期冷却液温度显著升高, 导致下游区域冷却能力下降。针对这一问题, 提出了一种分布式并联流道与局部扰流结构相结合的设计方案。

并联流道将入口冷却液分流为多个独立支路, 各支路分别覆盖不同电池区域后汇入集流管。该结构可避免串联流道中冷却液温升累积效应, 使各区域的冷却条件趋于一致。在流道内部增设周期性扰流柱, 诱导局部湍流以破坏热边界层发展, 增强壁面换热系数。扰流柱的形状、间距与高度需在流动阻力与换热增益之间进行权衡, 通过参数化分析确定了菱形扰流柱、纵向间距8 mm、高度为流道高度60%的优化配置。

冷却液的流量分配均匀性是并联流道设计的另一关键指标。通过在分流腔与集流腔内设置导流结构, 并合理调整各支路入口的局部阻力系数, 使各支路流量差异控制在5%以内。流量分配均匀性的改善直接转化为电池表面温度分布的一致性的提升。

2.3 分级协同控制策略

热管理系统的控制策略决定了各执行部件在不同工况下的响应模式。传统开关控制模式存在滞后性大、能耗高等缺点, 本研究采用分级协同控制策略。该策略以电池包最高温度、最低温度及平均温度作为输入变量, 将控制过程划分为三级。

一级模式适用于电池温度处于15℃至30℃的舒适区间。在此模式下, 液冷泵以最低转速运行, 冷却风扇与压缩机处于关闭状态, 相变材料依靠自身显热与潜热调节能力维持温度稳定, 系统能耗降至最低。

二级模式在电池温度超过30℃但低于38℃时触发。液冷泵转速根据温度偏差进行比例调节, 压缩机以低功率状态运行, 冷却液温度设定为25℃。此阶段以温和散热为主, 避免过度冷却造成的能量浪费。

三级模式在电池温度超过38℃或检测到快速充电信号时激活。液冷泵与压缩机均切换至额定工况, 冷却液温度设定为20℃, 同时启动风扇强化散热。若电池包内最大温差超过4℃, 则通过调节各并联支路的阀门开度对局部热点进行定向强化冷却。三级模式的退出采用滞环控制策略, 防止系统在阈值附近频繁切换。

三、性能分析与验证

3.1 仿真与试验方案

为验证优化后热管理系统的性能,建立了电池包的集总参数热模型与计算流体力学模型。模型中将电池单体等效为均匀发热体,产热率根据实际充放电工况的电流与内阻数据计算。液冷回路与相变材料层的传热过程采用共轭传热方法进行求解。

试验验证依托自主搭建的电池热管理系统测试平台进行。测试平台由环境舱、充放电设备、数据采集系统及待测电池包组成。电池包由96个方形锂离子电池单体串联构成,额定容量为150 Ah,总能量为48 kWh。环境舱温度控制范围为-20℃至60℃,精度为±1℃。温度采集点布置于

每个电池单体的正负极耳及壳体中部位置,共计布置温度传感器128个。

选取两种典型极端工况进行性能测试:工况一为高温环境快充工况,环境温度40℃,电池初始温度40℃,以1.5C倍率恒流充电至荷电状态80%;工况二为低温加热工况,环境温度-10℃,电池初始温度-10℃,以0.5C倍率放电。将优化后系统与采用蛇形流道加开关控制的基准系统进行对比分析。

3.2 高温快充工况性能对比

高温快充工况是检验热管理系统散热能力的最严苛场景之一。在该工况下,电池持续以大电流充电,产热速率高且持续时间长。表1列出了优化后系统与基准系统在高温快充工况结束时的关键性能指标对比。

表1 高温快充工况下热管理系统性能指标对比

性能指标	基准系统	优化后系统	改善幅度
电池包最高温度(℃)	48.6	41.3	下降7.3℃
电池包最低温度(℃)	40.2	37.8	下降2.4℃
电芯间最大温差(℃)	8.4	3.5	下降4.9℃
系统总能耗(kWh)	1.38	1.15	下降16.8%
相变材料熔化比例(%)	—	72.4	—

如表1所示,优化后系统的电池包最高温度控制在41.3℃,低于45℃的安全阈值,而基准系统最高温度达到48.6℃,已超出安全边界。在温度一致性方面,优化后系统的电芯间最大温差为3.5℃,满足5℃的设计要求,基准系统的温差高达8.4℃,表明存在显著的温度不均匀问题。温度分布不均的改善得益于并联流道带来的均匀流量分配以及相变材料的均温缓冲作用。

在能耗方面,优化后系统的泵与压缩机总能耗较基准系统降低16.8%。能耗下降主要来源于分级协同控制策略:在温度未超过38℃之前,系统运行于二级模式而非直接切换至满负荷状态,避免了不必要的能量消耗。同时,相变材料在充电初期吸收了大量热量,延迟了液冷系统进入高功率模式的时间节点。

3.3 低温工况性能分析

低温工况下热管理系统的主要任务是电池加热。基准系统采用电加热膜方案,加热功率固定,电池升温速度较慢且存在局部过热风险。优化后系统利用液冷回路循环加热液的方式实现间接加热,同时通过分级控制策略调节加热功率。试验结果表明,在-10℃环境温度下,优化后系统将电池包

从-10℃加热至15℃所需时间为22分钟,较基准系统的31分钟缩短了29%。加热均匀性方面,优化后系统加热结束时电芯间最大温差为2.1℃,基准系统为4.3℃。

结论

本研究针对新能源汽车电池热管理系统存在的温度均匀性差、极端工况适应性不足及能耗偏高等问题,开展了系统性的优化设计与性能验证。提出了液冷与复合相变材料耦合的热管理架构,采用分布式并联流道与扰流结构相结合的液冷板设计方案,并建立了分级协同控制策略。仿真与台架试验结果表明:在40℃高温环境下以1.5C倍率快充时,优化后系统将电池包最高温度控制在41.3℃,电芯间最大温差降至3.5℃,系统能耗降低16.8%;在-10℃低温环境下,加热时间缩短29%,加热均匀性显著改善。研究成果验证了耦合热管理方案的技术可行性,为高安全、高效率的新能源汽车电池热管理系统设计提供了参考依据。后续研究可进一步探索基于模型预测控制等先进算法的热管理策略优化,以及系统在全生命周期内的性能衰减规律。

参考文献

- [1]熊安扬.新能源汽车电池热管理系统优化设计研究[J].汽车测试报告,2025,(24):58-60.
- [2]周水华.新能源汽车电池热管理系统设计及测试方法分析[J].汽车测试报告,2025,(18):40-42.
- [3]许保寿.新能源汽车电池热管理系统智能优化设计[J].汽车知识,2025,25(10):26-28.
- [4]田文杰,宋小艳,董宸玮,等.电动汽车电池组热管理系统研究[J].科技创新与应用,2025,15(16):148-151.DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.16.034.